

## 섬유에 의하여 구속된 원형 콘크리트 기둥의 최대변형률 예측

이정윤<sup>1)\*</sup> · 정훈식<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 성균관대학교 건축공학과 <sup>2)</sup> (주)플러스구조

(2003년 3월 7일 원고접수, 2003년 8월 12일 심사완료)

### Prediction of the Maximum Strain of Circular Concrete Columns Confined with Fiber Composites

Jung-Yoon Lee<sup>1)\*</sup> and Hoon-Sik Jeong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

<sup>2)</sup> Plus Structural Engineers & Associates, 602 Wonkyung Bldg. 113-2, Samsung-Dong, Kangnam-Ku. Seoul, Korea

(Received March 7, 2003, Accepted August 12, 2003)

#### ABSTRACT

Concrete columns confined with high-strength fiber composites can enhance its strength as well as maximum strain. In recent years, several equations have been developed to predict the behavior of the concrete columns confined with fiber composites. While the developed equations can predict the compressive strength of the confined columns with reasonable agreement, these equations are not successful in predicting the observed maximum strain of the columns. In this paper, a total of 61 test results is analysed to propose an equation to predict both compressive strength and maximum strain of concrete cylinders. The proposed equation takes into account the effects of confining pressure and cylinder size. Furthermore, in order to verify the proposed stress-strain curve for concrete cylinders, six cylindrical specimens were tested. Comparisons between the observed and calculated stress-strain curves of the tested cylinders showed reasonable agreement.

**Keywords :** carbon fiber sheet, confining pressure, reinforced concrete columns, compressive strength, maximum strain

#### 1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 증축, 시간의 경과에 따른 콘크리트의 성능 저하, 지진과 같은 우발하중에 의한 구조물의 기능상실 등의 여러 외적요인에 의하여 필연적으로 보수·보강이 필요하다. 지난 10여년간 국내·외에서는 섬유보강체(FRP)를 이용한 구조물의 보수·보강을 철근콘크리트 연구의 중요한 분야로 인식하여 이 분야에 대한 많은 연구가 수행되었다. 섬유로 보강된 콘크리트의 구속효과에 대한 연구로 Mirmiran 등<sup>1,2)</sup>은 콘크리트 원주시험체에서 얻은 횡방향변형률 및 횡구속효과를 Richard 등의 철근평가식<sup>3)</sup>에 적용하였다.

에너지 소산에 근거한 Mander 등<sup>4)</sup>의 횡방향구속철근 모델은 Pantazopoulou 등<sup>5)</sup>과 Monti 등<sup>6)</sup>에 의하여 섬유에 적용할 수 있도록 발전되었다. 이들 평가식에서는 횡방향

변형률의 증가에 따라 콘크리트의 횡구속압력도 증가하는 증분법이 적용되었고, 이러한 증분법은 Saafi 등<sup>7)</sup>의 평가식에도 사용되었다. 국내에서는 천성철 등<sup>8)</sup>이 실험결과에서 얻어진 횡방향변형률을 Mander 등<sup>4)</sup>의 횡방향구속철근 모델에 적용하여 섬유보강된 콘크리트의 구속효과를 평가하였다.

섬유를 보강한 콘크리트의 구속효과에 대하여 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔지만, 기존 제안식의 대부분은 횡구속된 콘크리트의 압축강도예측에 중점을 두고 있으며, 예측된 최대변형률은 실제값을 과대 또는 과소 평가하는 경향이 있다. 특히 현재 널리 사용되고 있는 식 중의 하나인 Mirmiran 등의 식에서는 최대변형률을 초기 할선 탄성계수보다 상대적으로 작은 접선계수의 값  $E_c$ 에 의하여 결정한다. 따라서 예측된 강도의 작은 차이에 대해서도 최대변형률은 크게 영향을 받는다. 예를 들어, 횡구속압이 13.2MPa인 콘크리트의 압축응력-변형률 관계를 Mirmiran 등의 식에 의하여 구하면, 횡구속된 콘크리트의 응력이 10%증가할 경우 변형률은 약 33% 증가한다.

\* Corresponding author

Tel : 031-290-7564 Fax : 031-290-7570

E-mail : jylee@skku.ac.kr

이 논문에서는 기존의 실험에 대한 분석 및 콘크리트 실린더 실험을 통하여 섬유보강된 콘크리트의 압축강도 및 최대변형률을 예측할 수 있는 평가식을 제안함을 목적으로 한다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 시험체 계획

탄소섬유에 의해 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위해, 지름 150 mm, 높이 300 mm인 원주형 시험체를 제작하였다. 슬럼프 값이 18 cm이며 최대골재 크기가 25 mm인 콘크리트를 시험체에 타설한 후에 28일간 습윤 양생하였다. 재령 28일인 콘크리트 시험체의 표면을 그라인더로 갈아낸 후에 프라이머를 도포하였다. 프라이머는 3일간 양생하였으며, 그 후에 에폭시 수지와 함께 탄소섬유시트(carbon fiber sheet, 이하 CFS)를 시험체 표면에 합침 및 도포하였다. 에폭시 수지는 10일간 양생하였다. 각 시험체의 콘크리트 및 탄소섬유의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1에서  $f_{ck}$ 는 원주공시체 콘크리트의 압축강도,  $\epsilon_{co}$ 는 원주공시체 콘크리트의 압축강도에 상응하는 변형률,  $f_{fs}$ 는 탄소섬유의 파단강도,  $E_{fs}$ 는 탄소섬유의 탄성계수,  $\epsilon_{fo}$ 는 탄소섬유의 파단변형률,  $t$ 는 탄소섬유의 두께이다.

### 2.2 실험 및 측정장치

실험은 3000 kN 용량의 만능실험기를 사용하여 이루어졌다. 시험체의 축방향 변형률은 Fig. 1과 같이 시험체 상하 1/3 위치에 앵커를 설치한 후, 120도 각도에 3개의 변위측정기(LVDT)를 설치하여 측정하였다. 시험체의 횡방향 변형률을 측정하기 위하여 시험체의 1/2 높이에 3개의 변위측정기를 120도 각도로 설치하였다. Fig. 1은 시험체의 변위측정기 위치를 나타낸다.

Table 1 Material properties of the specimens

Specimen	Concrete		Carbon fiber			
	$f_{ck}$ (MPa)	$\epsilon_{co}$ (%)	$f_{fs}$ (MPa)	$E_{fs}$ (GPa)	$\epsilon_{fo}$ (%)	$t$ (mm)
F0	36.2	0.24	0	0	0	0
F1	36.2	0.24	4510	250	1.8	0.11
F2	36.2	0.24	4510	250	1.8	0.22
F3	36.2	0.24	4510	250	1.8	0.33
F4	36.2	0.24	4510	250	1.8	0.44
F5	36.2	0.24	4510	250	1.8	0.55

## 3. 실험 결과

탄소섬유에 의해 횡구속된 시험체는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도( $f_{ck} = 36.2 \text{ MPa}$ )에 도달할 때까지 축응력-축방향 변형률 관계는 안정된 곡선을 나타내며, 시험체의 외관도 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나  $f_{ck}$ 에 도달한 후, 시험체의 축응력-축방향 변형률관계는 구속된

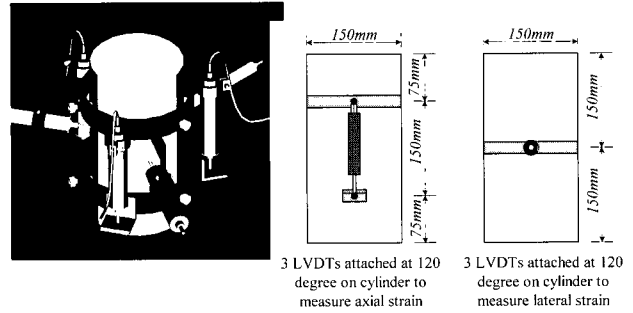


Fig. 1 Locations of LVDTs

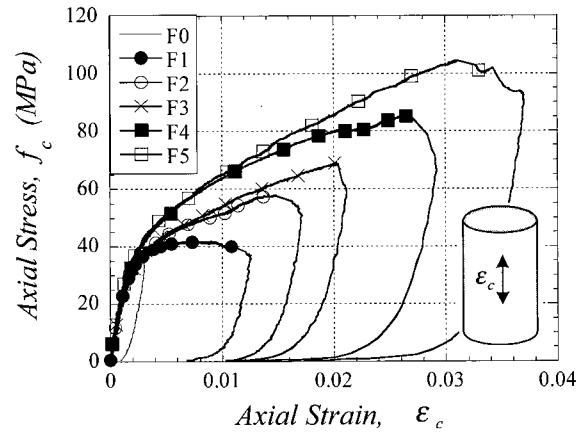


Fig. 2 Axial stress-axial strain curves of the tested concrete cylinders

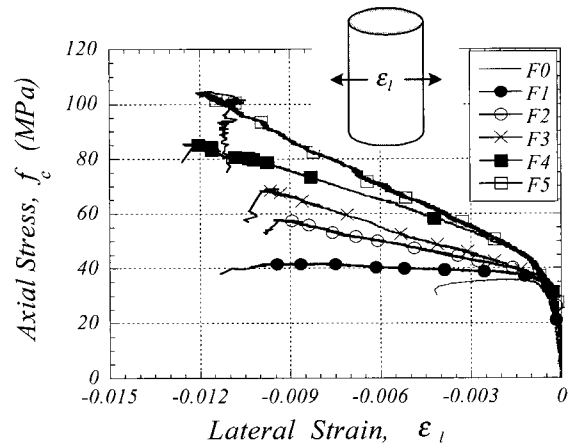


Fig. 3 Axial stress-lateral strain curves of the tested concrete cylinders

**Table 2** Compressive strength and the maximum strain of the tested concrete cylinders

Cylinders	$f_{cu}$ (MPa)	$\epsilon_{cu}$	$f_{cu}/f_{ck}$	$\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$
F0	36.2	0.0024	1.00	1.00
F1	41.7	0.010	1.15	4.17
F2	57.8	0.015	1.60	6.25
F3	69.1	0.020	1.91	8.33
F4	85.4	0.027	2.36	11.25
F5	104.3	0.031	2.88	12.92

탄소섬유의 두께에 따라 Fig. 2와 같이 다양한 곡선을 나타내며 변화하였다.

CFS를 1배 보강한 F1의 경우, 시험체의 응력이  $f_{ck}$ 에 도달한 이후에 축방향 변형률( $\epsilon_c$ )이 급격히 증가하며, 최종적으로 시험체 상부로부터 1/3되는 위치의 CFS가 파단한 후에 내력이 급감하였다.

CFS를 5배 보강한 F5의 경우, 시험체의 응력이 104.3MPa에 도달할 때까지 축응력-축방향 변형률관계는 안정된 곡선을 나타내었으며, 시험체의 응력이 104.3MPa에 도달한 이후에 큰 소리와 함께 시험체 상부로부터 1/3되는 위치의 CFS가 파단하였다. 각 시험체의 압축강도 및 최대 변형률은 CFS의 보강 두께가 증가함에 따라 증가하였다.

Table 2는 실험에 의하여 구한 시험체의 압축강도( $f_{cu}$ )와 최대변형률( $\epsilon_{cu}$ )이다. CFS를 1배 보강한 F1의 경우, 보강하지 않은 시험체에 대하여 압축강도와 최대 변형률이 각각 1.15배와 4.17배 증가하였지만, CFS를 5배 보강한 F5의 압축강도와 최대변형률은 각각 2.88배와 12.92배 증가하였다.

Fig. 3은 압축실험에 의하여 구한 시험체의 축방향응력과 횡방향변형률( $\epsilon_l$ ) 관계이다. 그림에서 횡방향 변형률은 기본 시험체(F0)의 강도  $f_{ck}=36.2MPa$ 에 도달한 후 급격하게 증가하였다.  $f_{ck}=36.2MPa$  이후 각 시험체의 기울기는 축응력-축방향 변형률 기울기의 경향과 유사하게 CFS의 보강에 비례하여 증가하였다. 그러나 최대 횡방향변형률은 CFS의 보강량과 무관하게 거의 일정한 횡방향 변형률 기울기( $\epsilon_l \approx 0.011$ )를 나타냈다.

시험체의 축방향 응력과 체적변형률( $\epsilon_v = \epsilon_c + 2\epsilon_l$ ) 관계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 횡방향 구속이 비교적 작은 시험체 F1과 F2, 횡방향 구속이 비교적 큰 시험체 F3, F4, F5의  $f_c - \epsilon_v$  관계는 서로 상이하다. 시험체 F1은 횡방향 변형률의 증가량이 축방향변형률의 증가량보다 커진 후에(Fig. 4의 A점,  $f_c \approx 35.2MPa$ ) 체적변형률의 반전없이 파괴할 때까지 체적변형률이 계속해서 증가하였다.

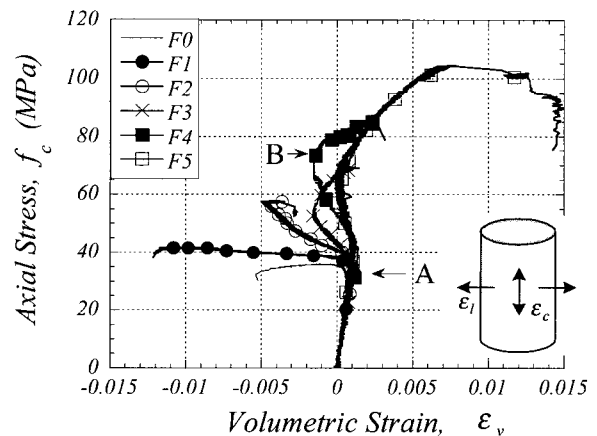
그러나 F3, F4, F5는 첫 번째 반전 이후, 응력이 증가함

**Table 3** Compressive stress and the volumetric strain at conversion and strength dropping

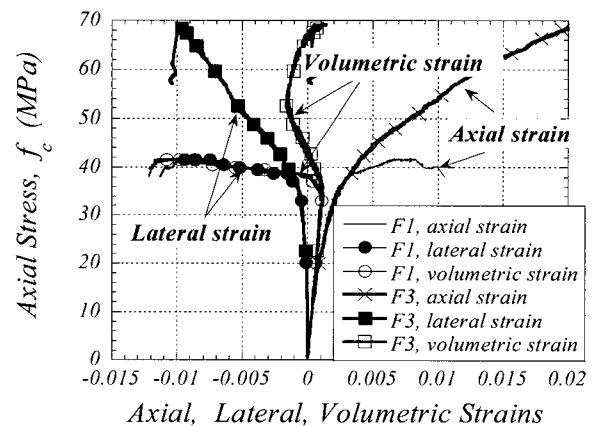
Cylinders	First conversion		Second conversion		Strength dropping	
	$\epsilon_v$	$f_c$ (MPa)	$\epsilon_v$	$f_c$ (MPa)	$\epsilon_v$	$f_c$ (MPa)
F0	0.00065	30.1	-	-	-0.0053	32.2
F1	0.00100	35.2	-	-	-0.0170	41.7
F2	0.00100	37.4	-0.00500	57.5	-0.0035	57.8
F3	0.00114	35.6	-0.00156	53.7	0.00144	69.2
F4	0.00135	40.4	-0.00155	70.0	0.00273	85.4
F5	0.00100	43.1	0.00017	64.0	0.01240	102.1

에 따라 축방향변형률의 증가량이 횡방향 변형률의 증가량보다 커져서 두 번째 전환점이 발생하였다(F2의 경우 Fig. 4의 B점).

축방향 응력과 체적변형률( $\epsilon_v$ )의 주요 전환점 (첫 번째 반전, 두 번째 반전, 응력저하)의 체적변형률과 압축응력



**Fig. 4** Axial stress-volumetric strain curves of the tested concrete cylinders



**Fig. 5** Axial stress-axial, lateral, and volumetric strain curves of the cylinders

은 Table 3과 같다. 두 번째 전환점의 체적변형률은 횡구속력이 증가함에 따라 증가하였으며, 시험체가 압축강도에 도달했을 때의 체적변형률도 횡구속력이 증가함에 따라 증가하였다.

각 방향 변형률간의 관계를 살펴보기 위하여 시험체 F1 및 F3에 대한 축방향 응력과 각 방향 변형률의 관계를 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 5에서 횡구속되지 않은 시험체의 강도( $f_{ck}=36.2MPa$ )에 도달하기까지 F1과 F3의 각 방향변형률 및 응력 곡선은 매우 유사하였다.

$f_{ck}=36.2MPa$  이후에 횡방향 변형률이 급격히 증가하여 체적 변형률이 첫 번째 반전을 일으키며, 응력-변형률곡선의 기울기도 감소하였다. 첫 번째 체적변형률이 반전한 후에 F1과 F3의 횡방향 변형률은 최대 변형률( $\epsilon_f \approx -0.01$ )에 도달하기까지 거의 일정한 비율로 증가하였다.

반면 F3의 축방향 변형률의 최대값은 F1의 최대 변형률보다 2배 이상 커서  $f_c=53.7MPa$ 에서 체적변형률이 두 번째로 반전하였다. 그러나 첫 번째 반전과는 다르게 두 번째 체적 변형률의 전환점에서는 축응력-축방향 변형률 관계에는 큰 변화가 나타나지 않았다.

#### 4. 구속된 콘크리트의 거동 예측

탄소섬유에 의해 횡구속된 콘크리트 시험체의 응력-변형률 곡선은 Fig. 2와 같이 무구속 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ ) 도달 전과 도달 후로 크게 구분할 수 있다. 또한 콘크리트의 최대압축강도와 최대변형률은 횡구속력에 따라 달라진다.

##### 4.1 구속 콘크리트의 압축강도

Fig. 2와 같이 횡구속된 콘크리트의 축방향 응력-변형률의 접선계수는  $f_{ck}$ 에 도달한 후에 급격히 감소한다. 특히 횡구속이 적은 F1에서는 콘크리트 압축응력의 큰 증가 없이 변형률만 증가하였다. 각 시험체의 횡방향 구속강도( $f_t$ )를 다음 식에 의하여 계산하면 Table 4와 같다.

$$f_t = \frac{2f_{yt}t}{D} \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 시험체의 직경,  $t$ 는 탄소섬유의 두께이다.

Table 4 Confining pressure of the cylinders

Cylinders	F0	F1	F2	F3	F4	F5
$f_t(MPa)$	0	6.61	13.2	19.8	26.5	33.1

3축 횡구속을 받는 콘크리트의 최대 압축응력에 대해서 Richart 등<sup>9)</sup> 과 Balme 등<sup>10)</sup>은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} + \alpha f_t^\beta \quad (2)$$

식 (2)의 계수  $\alpha$ 에 대해 Richart 등<sup>9)</sup>은 실험을 통하여 4.1을 제시하였으며, Balmer 등<sup>10)</sup>은 평균 5.6을 제시하였다. 한편 Mander 등<sup>4)</sup>은 에너지 소산에 근거하여 나선형 철근으로 구속된 콘크리트 실린더의 최대 압축응력을 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_t}{f_{ck}}} - 2 \frac{f_t}{f_{ck}} \right) \quad (3)$$

탄소섬유로 구속된 콘크리트에 대해서 Mirmiran 등<sup>1,2)</sup>은 실린더 실험에 근거하여 다음 식과 같이  $\alpha=6.0$ ,  $\beta=0.7$ 을 제시하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} + 6 f_t^{0.7} (MPa) \quad (4)$$

Saafi 등<sup>7)</sup>은 보통강도 및 고강도 콘크리트 압축강도 실험을 통하여  $f_{cu}$ 는 횡구속력( $f_t$ )과 함께 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )의 영향을 받음을 파악하여  $\alpha=2.2/(f_{ck}^{0.84})$ ,  $\beta=0.84$ 이 적용된 식을 제안하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} \left( 1 + 2.2 \left( \frac{f_t}{f_{ck}} \right)^{0.84} \right) \quad (5)$$

그러나 이러한 기존의 제안식은 콘크리트의 횡구속력이 클 경우에 대해서는 실험식을 비교적 잘 예측하지만 횡구속력이 작은 경우는 압축강도를 과대 평가하는 경향이 있다. 이 논문에서는 3장에서 설명한 실험결과 및 기존의 실험결과<sup>1,7,11,12)</sup>에 근거하여 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 압축강도에 대한 식을 제안하였다. 기존의 실험결과에 대한 재료조건은 Appendix에 상세히 설명되어 있다. 사용된 시험체의 주요 변수 범위는

$$20MPa \leq f_{ck} \leq 60MPa, \quad 3.54MPa \leq f_t \leq 33.1MPa, \\ 230MPa \leq f_{fy} \leq 4510MPa \quad \text{이다.}$$

Fig. 6(a)는 실험에서 측정된  $f_{cu}/f_{ck} - f_t/f_{ck}$ 와 기존의 Mander 등, Mirmiran 등, Saafi 등의 예측결과를 비교하고 있다. Mirmiran 등의 식에서는  $f_{ck}$ 를  $30MPa$ 로 가정하였다. Fig. 6(a)에서 나선형 구속철근 실험에 근거한 Mander 등의 식은 전반적으로 섬유보강 콘크리트의 압축강도를 과대 평가하였다. 섬유보강 콘크리트의 실험결과에 근거하여 제안된 Saafi 등과 Mirmiran 등의 식은 Mander 등의 식의 예측값보다 정확히 섬유보강 콘크리트의 압축강도를 예측하였지만, 횡구속압이 작은 경우 ( $f_t/f_{ck} < 0.4$ )

실험값을 과대 평가하였다.

콘크리트의 압축강도는 시험체의 크기효과 (직경, 높이/직경 등)에 따라 달라진다. Fig. 6(b)는 시험체 직경  $D$ 의 변화에 대한  $f_{cu}/f_{ck}$  값이다. 그림에서 구속콘크리트의 압축강도는 시험체의 직경이 감소할수록 증가하였다.

이 연구에는 섬유보강된 콘크리트의 압축강도를 무구속 콘크리트의 압축강도, 횡구속압 및 시험체의 크기효과를 고려하여 계산하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} + 80 \left( \frac{f_l}{f_{ck}} \right)^{0.9} - 0.005 \frac{D}{t} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

제안된 식 (6)은 기존의 Saafi 등의 제안식과 유사하게 횡구속력( $f_l$ )과 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )의 영향을 포함하고 있다. 제안식에 의하여 계산된 콘크리트의 압축강도는  $f_l$ 이 증가함에 따라 증가하지만, 그 비율은 콘크리트의 압축강도  $f_{ck}$ 에 따라 달라진다. 기존의 제안식은 Fig. 6(a)와 같이 횡구속력이 작은 콘크리트의 압축강도를 과대 평가하지만 식 (6)에는 시험체의 크기효과  $D/t$ 를 고려하여  $f_l$ 이 작은 시험체의 압축강도를 Fig. 7과 같이 정확히 예측하였다.

Fig. 8은 횡구속력의 변화에 따라 실험에서 관찰된 압축강도  $f_{cu(\text{exp})}$ 를 기존의 평가식 및 제안식에 의한 압축강도  $f_{cu(\text{pre})}$ 에 의하여 나눈 값이다. Fig. 8에서 나선형 철근의 실험결과에 근거한 Mander 등의 식은 FRP에 의하여 구속된 압축강도를 과대평가하고 있다. 최대 압축응력을  $f_l$ 과  $f_{ck}$ 만에 의하여 평가하고 있는 Mirmiran 등의 식과 Saafi 등의 식은 횡구속력이 클 경우에 대해서는 실험값을 유사하게 예측하지만 횡구속력이 작은 시험체 F1 및 F2에 대해서는 압축강도를 과대 평가하였다. 그러나 제안된 식 (6)은  $f_l$ ,  $f_{ck}$ , 크기효과를 고려한  $D/t$ 의 영향을 평가하여 횡구속력이 비교적 작은 F1 및 F2에 대해서도 실제 압축강도를 기존식보다 정확하게 예측하였다.

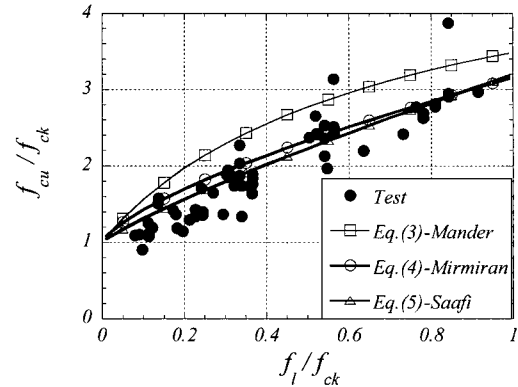
#### 4.2 구속 콘크리트의 최대 압축변형률

구속 콘크리트에 대한 기존 연구의 대부분은 구속 콘크리트의 압축강도 예측에 중점을 두고 있으며, 최대 변형률에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. Mander 등은 나선형 철근에 의하여 구속된 콘크리트의 최대 변형률 ( $\epsilon_{cu}$ )을 에너지 소산에 근거하여 다음 식과 같이 제안하였다.

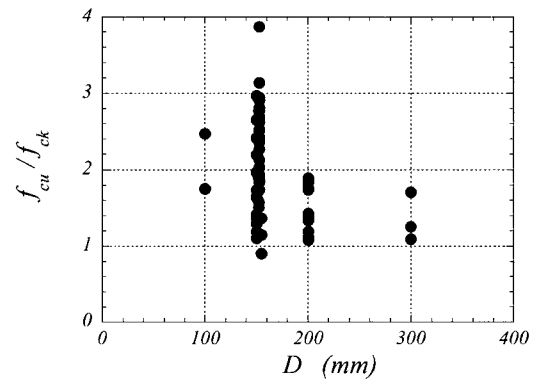
$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left( 1 + 5 \left( \frac{f_{cu}}{f_{ck}} - 1 \right) \right) \quad (7)$$

식(7)에서  $\epsilon_{cu}$ 는  $\epsilon_{co}$ ,  $f_{cu}$  및  $f_{ck}$ 의 함수로  $f_{cu}$ 이 증

가함에 따라 증가한다. 한편, Mirmiran 등의 식에서는 횡구속된 콘크리트의 강도와 접선계수를 예측한 후, 최대 변형률을 다음 식과 같이, 초기 활선 탄성계수보다 상대적으로 접선계수의 값이 작은  $E_{c2}$ 값에 의하여 결정된다. 이 식에 의하면 예측된 강도의 작은 차이에 대해서도 최대 변형률은 크게 영향을 받는다.



(a)  $f_{cu}/f_{ck} - f_l/f_{ck}$  relationship



(b)  $f_{cu}/f_{ck} - D$  relationship

Fig. 6  $f_{cu}/f_{ck} - f_l/f_{ck}$  and  $f_{cu}/f_{ck} - D$  relationships

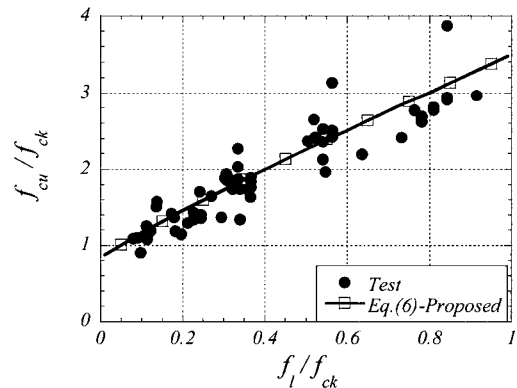


Fig. 7 Comparison of the predicted and observed  $f_{cu}/f_{ck} - f_l/f_{ck}$  relationship

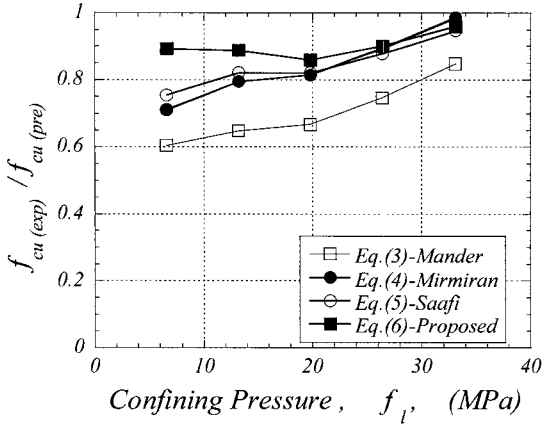


Fig. 8  $f_{cu(exp)}/f_{cu(pre)} - f_l$  relationship

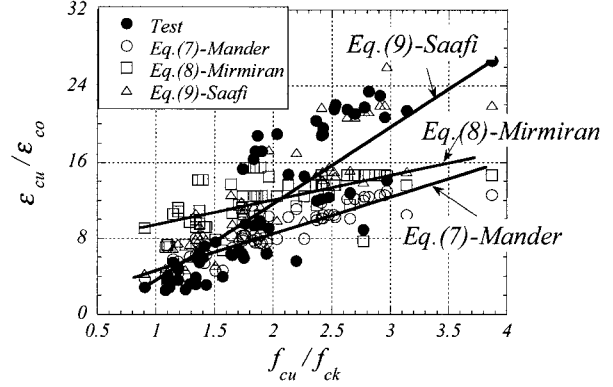
$$\epsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_o}{E_c} \quad (8)$$

Saafi 등도 섬유 구속 콘크리트의 실험결과를 Mander 등의 식에 적용하여 다음 식을 제안하였다. 이 식에서는 식 (8)의 상수 '5' 대신에 섬유의 파단변형률( $\epsilon_{fo}$ )이 사용되었다.

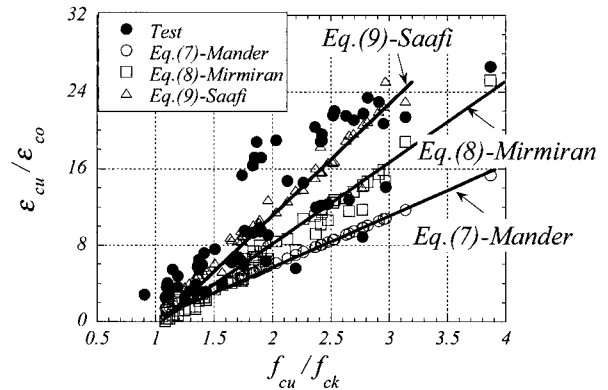
$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left( 1 + (537\epsilon_{fo} + 2.6) \left( \frac{f_{cu}}{f_{ck}} - 1 \right) \right) \quad (9)$$

이러한 기존의 제안식은 섬유 보강 콘크리트의 최대변형률을 정확하게 예측하지 못하고 실제값과 큰 차이를 나타냈다. 따라서, 이 논문에서는 본 실험결과 및 기존의 실험결과<sup>1,7,11,12</sup>에 근거하여 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률에 대한 식을 제안하였다. 기존의 실험결과에 대한 재료조건은 Appendix에 상세히 설명되어 있다.

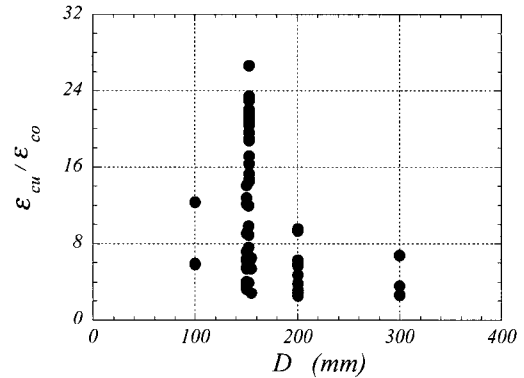
Fig. 9(a)는 실험에서 관찰된  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - f_{cu}/f_{ck}$ 와 기존의 Mander 등, Mirmiran 등, Saafi 등의 예측결과를 비교하고 있다. Fig. 9(a)에서는 제안된 식 (3)-(5)에 의하여  $f_{cu(pre)}$  값을 계산한 후 이를 기존의 식 (7)-(9)에 대입하여 최대 변형률( $\epsilon_{cu}$ )을 계산하였다. 그림에서 나선형 구속철근의 실험결과에 근거하여 제안된 Mander 등의 식 (7)의 계산 결과는 실제 최대 변형률과 많은 차이가 있다. 이 차이는 나선형철근의 경우, 항복변형률에 도달한 후에도 일정한 응력을 유지하지만, 탄소섬유는 인장강도에 도달한 후 섬유가 파단되어 최대 변형률이 결정되기 때문이다. Mirmiran 등의 식에 의하여 계산된 최대 변형률도 시험체의 변형률을 정확히 예측하지 못하였다. 이는 Mirmiran 등의 식에서는 식 (8)과 같이 최대변형률이 초기 활선 탄소계수보다 상대적으로 작은  $E_c$  값에 의하여 결정되어, 예측된 강도의 작은 차이에 대해서도 최대변형률이 크게 영향을 받기 때문이다.



(a)  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - f_{cu}/f_{ck}$  relationship (use  $f_{cu(pre)}$  calculated by Eqs.(3) through (5))



(b)  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - f_{cu}/f_{ck}$  relationship (use  $f_{cu(exp)}$  obtained from the tests)



(c)  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - D$  relationship

Fig. 9  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - f_{cu}/f_{ck}$  and  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co} - D$  relationships

Saafi 등의 식에 의하여 계산된 최대변형률은 Mander 등과 Mirmiran 등의 식의 예측값보다 정확히 최대변형률을 예측하였지만, 횡구속압이 작은 경우 실험값을 과대 평가하였다.

Fig. 9(b)에서는 시험체의 실제 압축강도  $f_{cu(exp)}$ 를 제안식(7)-(9)에 대입하여 최대 변형률이 계산되었다.

$f_{cu(exp)}$ 를 사용하여 계산된 최대 변형률은  $f_{cu(pre)}$ 를 사용하여 계산한 Fig. 9(a)의 최대 변형률보다 실제 최대 변형률을 정확히 예측하고 있다. 그러나 시험체의  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ 는  $f_{cu}/f_{ck}$ 의 변화에 따라 다양한 값을 나타내고 있어, 섬유유속된 시험체의 최대 변형률은  $f_{cu}/f_{ck}$ 와 함께 크기효과 등의 다른 변수에 의하여 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9(c)는 시험체 직경  $D$ 의 증가에 의한  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ 의 변화를 나타낸다. 그림에서 콘크리트의 최대 변형률은 시험체의 크기효과에 영향을 받아 시험체의 직경이 증가할수록 감소하였다. 따라서 이 연구에서는 섬유보강된 콘크리트의 최대 변형률을 다음 식과 같이 구속콘크리트의 압축강도, 섬유의 파단강도 및 시험체의 크기효과를 고려하여 계산하였다.

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} + \frac{0.0002}{\epsilon_{co}} \left( \frac{f_{fy}}{f_{ck}} \right)^{0.4} \left( \frac{t}{D} \right)^{0.6} \left( \frac{f_{cu}}{f_{ck}} \right)^{0.2} \quad (10)$$

Fig. 10은 실제 압축강도  $f_{cu(exp)}$  및 식 (6)의 예측 압축강도  $f_{cu(pre)}$ 를 식 (10)에 대입하여 계산한 최대 변형률과 시험체의 최대 변형률을 비교하고 있다. 식 (10)은 최대 변형률을 구속콘크리트의 압축강도와 함께 섬유의 파단강도 및 시험체의 크기효과를 고려하여  $f_{cu}/f_{ck}$ 의 변화에 따라 다양하게 달라지는  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ 를 비교적 정확하게 예측하였다.

Fig. 11은 횡구속력의 변화에 따라 실험에서 관찰된 최대 변형률( $\epsilon_{cu(exp)}$ )을 기존의 평가식 및 제안식에 의한 최대 변형률  $\epsilon_{cu(pre)}$ 에 의하여 나눈 값을 나타낸다. Fig. 11에서 나선형 철근의 실험 결과에 근거한 Mander 등의 식은 FRP에 의하여 구속된 최대 변형률을 근사하게 예측하였다. 그러나 Mirmiran 등의 식은 횡구속력이 큰 시험체 F4와 F5에 대해서는 실제 변형률을 유사하게 평가하였지만, 횡구속력이 작은 시험체 F1, F2, F3에 대해서는 실제 변형률을 과대 평가 하였다. Saafi 등의 식은 횡구속력의 크기와 무관하게 실제 변형률을 약 67%까지 과대평가 하였다. 이 이유는 섬유 구속된 시험체는 Fig. 3과 같이 횡방향 변형률( $\epsilon_l$ )이 섬유 파단 변형률( $\epsilon_{fo}$ )의 약 61%에 도달했을 때 보강된 섬유가 파단하여 축방향 최대 변형률에 도달했지만, Saafi 등의 식 (9)에서는 횡방향 변형률이  $\epsilon_{fo}$ 에 도달할 때 기둥이 축방향 최대 변형률 및 압축강도에 도달한다고 가정하기 때문이다.

제안된 식 (10)은  $f_{cu}$ 과  $f_{fo}$ 의 영향과 함께 크기효과를 고려한  $D/t$ 의 영향을 평가하여 횡구속력의 변화에 무관하게 F1에서 F5까지의 실제 최대 변형률을 정확히 예측하였다.

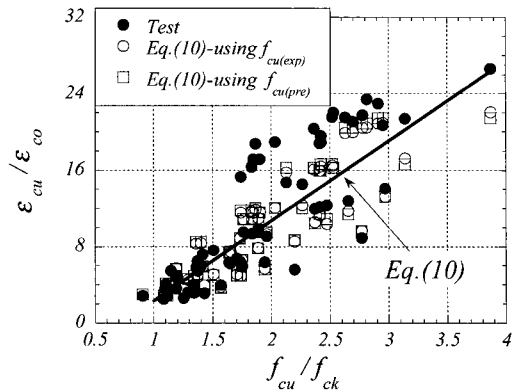


Fig. 10 Comparison of the predicted and observed  $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ - $f_{cu}/f_{ck}$  relationship

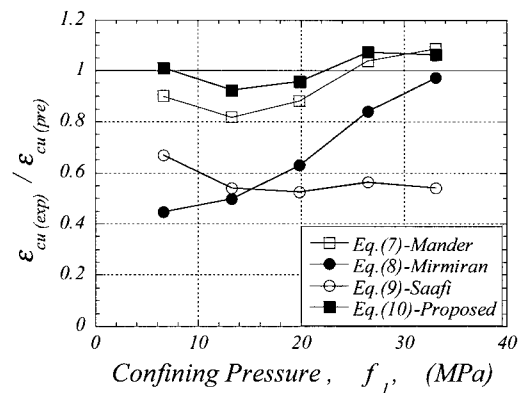


Fig. 11  $\epsilon_{cu(exp)}/\epsilon_{cu(pre)}$ - $f_l$  relationship

#### 4.3 구속 콘크리트의 응력-변형률관계

섬유에 의해 횡구속된 콘크리트 시험체의 응력-변형률 곡선은 Figs. 2-4와 같이 무구속 콘크리트의 압축강도 ( $f_{ck}$ )에 도달하기 이전과 도달 이후로 구분할 수 있다. 따라서 구속 콘크리트의 응력-변형률관계는  $f_{ck} = 36.2MPa$ 까지 무구속 콘크리트의 응력-변형률관계와 일치한다. 이 논문에서는 다음과 같은 2차식에 의하여  $f_{ck}$ 이전의 콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측하였다.

$$f_c = E_c \epsilon_c + \left( \frac{f_{ck} - E_c \epsilon_{co}}{\epsilon_{co}^2} \right) \epsilon_c^2 \quad (11)$$

여기서  $E_c$ 는 콘크리트의 할선 탄성계수,  $f_c$ 는 콘크리트의 응력,  $\epsilon_c$ 는 콘크리트의 변형률이다.

섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )에 도달한 후 나선형 철근에 의하여 구속된 콘크리트의 곡선과 다른 양상을 나타낸다. 철근은 항복응력에 도달한 후에 소성구역에서 변형률이 급격히 증가하지만, 섬유는 탄성범위 내에서 응력이 증가하

다가 갑자기 과단된다. 따라서, 나선형 철근에 의하여 구속된 콘크리트의  $f_{ck}$  이후의 접선계수  $E_{\epsilon}$ 는  $f_{ck}$  이전의 할선 탄성계수  $E_c$ 와 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의  $E_{\epsilon}$ 는 할선 탄성계수  $E_c$ 와 큰 차이를 나타내며,  $E_{\epsilon}$ 는 횡구속압  $f_l$ 이 증가할수록 커진다. Mander 등은 나선형 철근의 응력-변형률 곡선의 특성을 고려하여 다음 식을 제안하였다.

$$f_c = \frac{f_{cu} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (12)$$

식(12)의  $r$ 에 사용되는  $E_{sec}$ 은 구속콘크리트의 압축강도를 최대변형률로 나눈 값이다.

Mirmiran 등과 Saafi 등은 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률곡선을 각각 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$f_c = \frac{(E_c - E_{\epsilon})\epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_c - E_{\epsilon})\epsilon_c}{f_o}\right)^{n+1/n}\right]} + E_{\epsilon}\epsilon_c \quad (13)$$

$$f_c = f_{ck} \left(1 + 2.2 \left(\frac{f(\epsilon_l)}{f_{ck}}\right)^{0.84}\right) \quad (14)$$

여기서,  $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}}$ ,  $r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$ ,  $E_{sec} = \frac{f_{cu}}{\epsilon_{cu}}$ ,

$E_{\epsilon} = 245.61 f_{ck}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f t}{D}$ ,  $E_f$ =섬유의 탄성계수,

$f_o = 0.872 f_{ck} + 0.371 f_l + 6.258$  (MPa)이다.

식 (14)는  $f_{ck}$  이후의 응력-변형률 곡선에 대한 평가식이다. 식 (13) 및 (14)에서는 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의  $E_{\epsilon}$ 와  $E_c$ 의 차이가 반영되어  $f_{ck}$ 를 전후로 응력-변형률 곡선이 변화한다.

섬유보강 시험체에서 얻은 접선계수  $E_{\epsilon(\exp)}$ 와 식 (12)-(14)에 의하여 계산된 접선계수  $E_{\epsilon(\pre)}$ 의 값은 Fig. 12

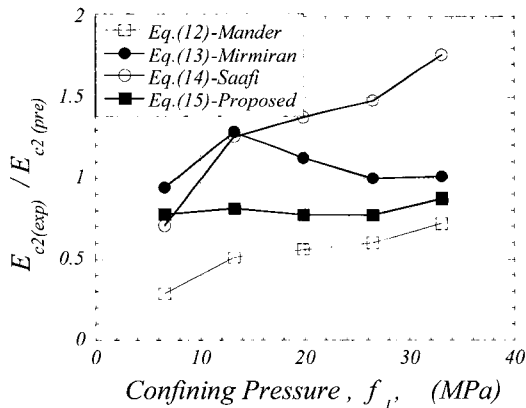


Fig. 12  $E_{\epsilon(\exp)}/E_{\epsilon(\pre)} - f_l$  relationship

섬유에 의하여 구속된 원형 콘크리트 기둥의 최대변형률 예측

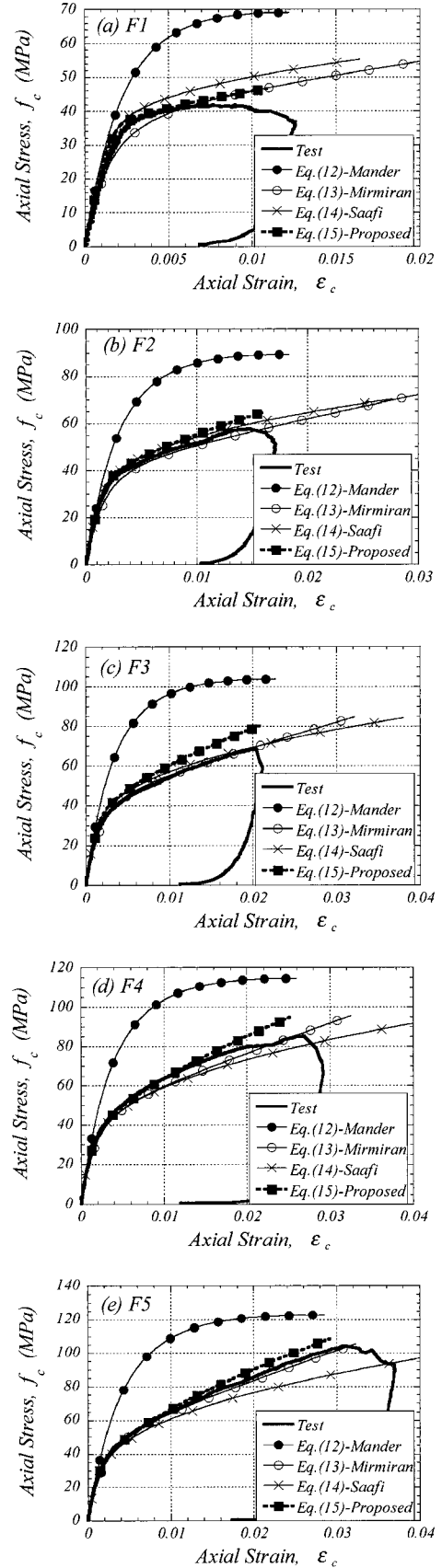


Fig. 13 Comparison of the axial stress-axial strain curves of the tested cylinders



와 같다. 그림에서 나선형 철근의 응력-변형률 곡선의 특성을 고려한 Mander 등의 식은  $E_{c2(exp)}$ 을 과대 평가하였고, 섬유유의 응력-변형률 곡선의 특성을 고려한 Saafi 등의 식은  $E_{c2(exp)}$ 을 과소 평가하였다. 기존의 제안식 중에서 Mirmiran 등의 식에 의한  $E_{c2(pre)}$ 는 실제의 접선계수  $E_{c2(exp)}$ 를 매우 정확히 예측하였다.

그러나 Mirmiran 등의 식에 의하여 계산할 경우  $\epsilon_c = \epsilon_{co}$ 일 때 콘크리트 압축강도  $f_c$ 는  $f_{ck}$ 와 일치하지 않는 경우가 발생한다. 이 연구에서는 본 연구의 실험결과와 기존 실험에 근거하여 섬유유의 응력-변형률 곡선의 특성을 고려한 다음의 식을 제안하였다.

$$f_c = f_{ck} + \frac{(f_{cu} - f_{ck})(\epsilon_c - \epsilon_{co})^{0.7}}{(\epsilon_{cu} - \epsilon_{co})^{0.7}} \quad (15)$$

제안된 식 (15)에서  $E_{c2(pre)}$ 는  $f_{cu}$ 와  $\epsilon_{cu}$ 에 의하여 계산된다. 또한 식 (15)는  $\epsilon_c = \epsilon_{co}$ 일 때  $f_c = f_{ck}$ 이 되어 Mirmiran 등의 식을 개선하였다.

Figs. 13(a)-(e)는 기존의 식 및 제안된 식에 의하여 예측된 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 실험에서 관찰된 응력-변형률 곡선을 비교하고 있다. 그림에서 Mander 등의 응력-변형률 곡선은  $f_{ck}$ 이후의  $E_{c2}$ 와  $E_c$ 의 차이가 없어서 실제 콘크리트의 응력을 과대평가하고 있다.

Mirmiran 등과 Saafi 등의 응력-변형률 곡선에서는 접선계수가  $f_{ck}$ 를 전후하여  $E_c$ 에서  $E_{c2}$ 로 변화하여 구속콘크리트의 응력-변형률 곡선을 유사하게 평가하였다. 그러나 Mirmiran 등의 제안식에서는  $\epsilon_c = \epsilon_{co}$ 일 때 콘크리트

압축강도  $f_c$ 는  $f_{ck}$ 와 일치하지 않았으며, Saafi 등의 제안식은 횡구속압  $f_l$ 의 증가에 따라 구속 콘크리트의 응력을 과소 평가하였다. 제안된 섬유유 구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선은  $f_l$ 의 크기에 무관하게 실제 곡선을 정확히 추적하였다.

## 5. 구속콘크리트의 압축강도 및 최대변형률 예측

### 5.1 구속 콘크리트의 압축강도 예측

Figs. 14(a)-(d)는 횡구속압  $f_l$ 에 대하여 기존식 및 제안식에 의하여 예측된 구속 콘크리트의 압축강도  $f_{ck(pre)}$ 와 실험에서 관찰된 압축강도  $f_{ck(exp)}$ 를 비교하고 있다. Mander 등의 제안식은 나선형 철근에 근거하여 제안된 식으로 섬유유 구속 콘크리트의 압축강도를 과대 평가하였다. Mirmiran 등 및 Saafi 등의 제안식에 의하여 예측된 압축강도는 실험값에 대하여 평균값이 각각 0.93와 0.96으로 Mander 등의 제안식보다 정확하게 콘크리트의 압축강도를 예측하였다. 그러나 두 식은 횡구속압이 작은 시험체의 압축강도를 과대 평가하였다. 횡구속압( $f_l$ ), 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ ), 및 시험체의 크기효과( $D/t$ )의 영향을 포함하고 있는 제안식은 평균 0.98과 변동계수 10.2%로 기존의 제안식보다 정확하게 구속 콘크리트의 압축강도를 예측하였다. 또한 제안식은 횡구속압( $f_l$ )이 작은 시험체에 대해서도  $f_l$ 이 큰 시험체와 비슷한 정도로 압축강도를 예측하였다.

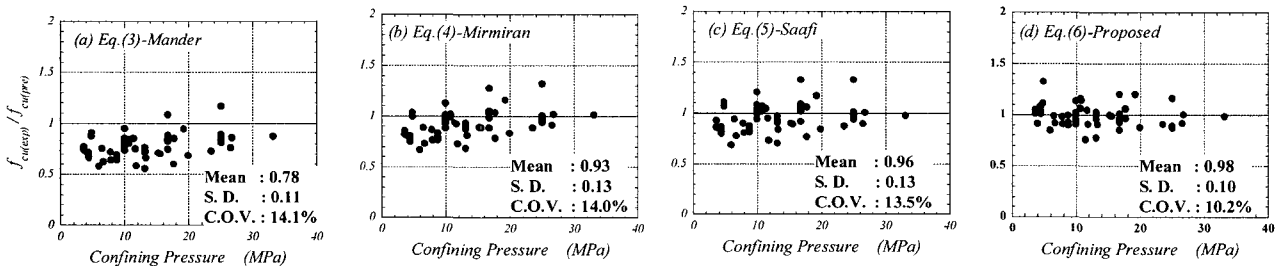


Fig. 14 Comparison of the compressive strength of the tested cylinders

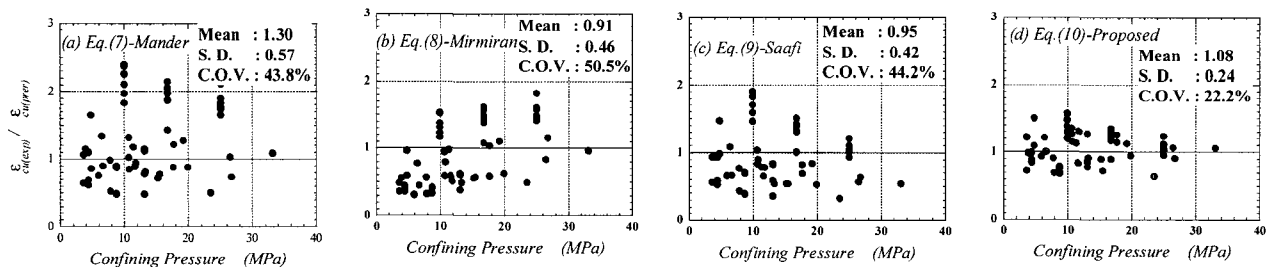


Fig. 15 Comparison of the maximum strain of the tested cylinders

5.2 구속 콘크리트의 최대변형률 예측

Appendix

Figs. 15(a)-(d)는 횡구속압( $f_l$ )에 대하여 기존식 및 제안식에 의하여 예측된 구속 콘크리트의 최대 변형률  $\epsilon_{ck(pre)}$ 와 실험에서 관찰된 최대 변형률  $\epsilon_{ck(exp)}$ 를 비교하고 있다. 이 논문의 서론에서도 언급한 바와 같이 구속 콘크리트에 대한 기존의 제안식은 압축강도를 비교적 정확하게 예측하고 있지만, 최대 변형률에 대한 예측정도는 매우 낮다. Mander 등의 제안식은 나선형 철근에 대한 실험결과에 근거하여 섬유보강 콘크리트의 최대 변형률을 과소평가 하였으며, 실험값  $\epsilon_{ck(exp)}$ 에 대한 변동계수는 Fig. 15(a)와 같이 43.8%였다. Mirmiran 등의 제안식은 섬유보강 콘크리트의 실험결과에 근거하여 제안되었지만, Fig. 15(b)와 같이  $f_{ck}$ 이후의 점선계수  $E_{c2}$ 의 영향을 받아 예측된 압축강도  $f_{cu}$ 의 작은 차이에 대해서도 변형률이 크게 영향을 받았다. Saafi 등의 제안식에서는 횡방향변형률( $\epsilon_l$ )이 최대값에 도달할 때 섬유가 파단하여 구속콘크리트가 최대변형률에 도달한다. 그러나 Fig. 3의 실험결과와 같이 횡방향변형률( $\epsilon_l$ )이 파단변형률( $\epsilon_{f0}$ )의 약 61%에 도달했을 때, 시험체의 응력은 압축강도(최대변형률)에 도달하는 경우가 발생한다. Mirmiran 등은 횡구속압이 작은 시험체의 최대변형률을 과대 평가하였지만, Saafi 등의 제안식은 횡구속압이 큰 시험체의 최대변형률을 과대 평가하였다. 구속콘크리트의 압축강도, 섬유의 파단강도 및 시험체의 크기효과를 고려하여 제안된 식 (10)은 평균 1.08과 변동계수 22.2%로 기존의 제안식보다 정확하게 구속 콘크리트의 최대 변형률을 예측하였다.

6. 결 론

이 논문에서는 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트 실린더 실험결과 및 기존의 실험결과에 근거하여 섬유구속 콘크리트의 축방향응력-변형률곡선을 예측하였다. 실험 및 분석을 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- 1) 구속콘크리트의 압축강도와 섬유의 파단강도 및 시험체의 크기효과를 고려하여 제안된 식은 평균 1.08과 변동계수 22.2%로 기존의 제안식보다 정확하게 구속 콘크리트의 최대 변형률을 예측하였다.
- 2) 횡구속압과 콘크리트의 압축강도 및 시험체의 크기효과 영향을 고려한 제안식은 구속 콘크리트의 압축강도를 평균 0.98과 변동계수 10.2%로 예측하였다.
- 3) 섬유의 응력-변형률곡선의 특성을 고려하여 제안된 구속 콘크리트의 축방향 응력-변형률곡선은 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률곡선을 정확하게 추적하였다.

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$D$ (mm)	$f_{fy}$ (MPa)	$\epsilon_{fo}$ (%)	$E_{fs}$ (GPa)	$t$ (mm)	$f_{cu}$ (MPa)	$\epsilon_{cu}$ (%)
DA11 <sup>1)</sup>	30.9	153	524	1.41	37.2	1.44	53.7	3.06
DA13 <sup>1)</sup>	30.9	153	524	1.41	37.2	1.44	56.5	3.27
DB11 <sup>1)</sup>	29.6	153	524	1.41	37.2	1.44	67.1	2.90
DB12 <sup>1)</sup>	29.6	153	524	1.41	37.2	1.44	55.3	3.76
DB13 <sup>1)</sup>	29.6	153	524	1.41	37.2	1.44	60.2	3.80
DC11 <sup>1)</sup>	32.0	153	524	1.41	37.2	1.44	59.1	3.43
DC12 <sup>1)</sup>	32.0	153	524	1.41	37.2	1.44	60.8	3.43
DA21 <sup>1)</sup>	30.9	153	579	1.44	40.3	2.20	72.9	4.07
DA22 <sup>1)</sup>	30.9	153	579	1.44	40.3	2.20	65.7	2.94
DA23 <sup>1)</sup>	30.9	153	579	1.44	40.3	2.20	78.0	4.41
DB21 <sup>1)</sup>	29.6	153	579	1.44	40.3	2.20	74.6	4.31
DB22 <sup>1)</sup>	29.6	153	579	1.44	40.3	2.20	93.0	4.28
DB23 <sup>1)</sup>	29.6	153	579	1.44	40.3	2.20	71.7	3.92
DC21 <sup>1)</sup>	32.0	153	579	1.44	40.3	2.20	77.4	3.79
DC22 <sup>1)</sup>	32.0	153	579	1.44	40.3	2.20	77.8	3.77
DA31 <sup>1)</sup>	30.9	153	641	1.57	40.7	2.97	85.7	4.35
DA33 <sup>1)</sup>	30.9	153	641	1.57	40.7	2.97	86.8	4.69
DB31 <sup>1)</sup>	29.6	153	641	1.57	40.7	2.97	86.2	4.60
DB32 <sup>1)</sup>	29.6	153	641	1.57	40.7	2.97	114.7	5.33
DB33 <sup>1)</sup>	29.6	153	641	1.57	40.7	2.97	87.4	4.14
DC31 <sup>1)</sup>	32.0	153	641	1.57	40.7	2.97	86.1	4.22
DC32 <sup>1)</sup>	32.0	153	641	1.57	40.7	2.97	84.0	4.30
C1 <sup>11)</sup>	20.1	100	3430	1.50	230	0.17	49.6	2.55
C2 <sup>11)</sup>	36.9	150	3510	1.50	235	0.17	47.6	0.80
C3 <sup>11)</sup>	36.9	150	3510	1.50	235	0.50	81.1	1.40
C4 <sup>11)</sup>	36.9	150	399	1.60	26.0	1.20	52.3	1.80
C5 <sup>11)</sup>	36.9	150	399	1.60	26.0	3.60	98.0	3.20
C8 <sup>11)</sup>	60.0	155	3500	1.50	230	0.13	54.3	0.77
C9 <sup>11)</sup>	60.0	155	3500	1.50	230	0.26	68.8	1.47
C10 <sup>11)</sup>	60.0	155	3500	1.50	230	0.39	82.3	1.75
C11 <sup>11)</sup>	42.0	100	1265	1.50	82.7	0.60	73.5	1.60
C12 <sup>11)</sup>	43.0	150	230	1.69	13.6	1.26	47.3	1.11
C13 <sup>11)</sup>	43.0	150	230	1.69	13.6	2.52	58.9	1.47
C14 <sup>11)</sup>	43.0	150	230	1.69	13.6	3.78	71.0	1.69
C15 <sup>11)</sup>	43.0	150	230	1.69	13.6	5.04	74.4	1.74
C16 <sup>11)</sup>	32.0	300	1770	1.50	84.0	0.30	40.0	0.66
C17 <sup>11)</sup>	44.0	300	1770	1.50	84.0	0.30	48.0	0.97
C18 <sup>11)</sup>	44.0	300	1770	1.50	84.0	0.90	75.0	1.82
C1 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.12	43.0	0.80
C2 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.02	41.6	0.71
C7 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.23	51.5	0.88
C9 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.23	55.0	0.86
C13 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.35	67.0	1.76
C14 <sup>12)</sup>	38.5	200	3720	1.55	240	0.35	51.5	1.09
C4 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.12	42.5	0.86
C11 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.23	48.5	1.04
C12 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.23	50.0	1.07
C16 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.35	63.0	1.72
C17 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.35	67.5	1.71
C18 <sup>12)</sup>	35.7	200	3720	1.55	240	0.35	65.5	1.69
GE1 <sup>7)</sup>	35.0	152	450	1.41	32.0	0.8	52.8	1.90
GE2 <sup>7)</sup>	35.0	152	505	1.49	34.0	1.6	66.0	2.47
GE3 <sup>7)</sup>	35.0	152	560	1.56	36.0	2.4	83.0	3.00
C1 <sup>7)</sup>	35.0	152	3300	0.90	367	0.11	55.0	1.00
C2 <sup>7)</sup>	35.0	152	3550	0.91	390	0.23	68.0	1.60
C3 <sup>7)</sup>	35.0	152	3700	0.89	415	0.55	97.0	2.22

4) 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 압축강도 및 최대 변형률은 횡구속압( $f_l$ )이 증가할수록 증가하였다. 그러나 시험체의 횡방향 변형률( $\epsilon_l$ )은 횡구속압에 무관하게 섬유파단 변형률( $\epsilon_{fo}$ )의 약 61%에 도달하였고 이 때 시험체는 압축강도에 도달하였다.

\* 참고문헌 12의 실험결과는 동일한 양의 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 세 가지 실험결과에 대하여 중간 값을 택함.

### 감사의 글

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구(과제번호 : KRF-2002-003-D00400)되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. Samman, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, Sep. 1998, pp.1025~1031.
2. Mirmiran, A. and Shahawy, M. "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, May, 1997, pp.583~590.
3. Richard, R. M. and Abbott, B. J., "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula," *Journal of Structural Mechanics*, ASCE, Vol.101, No.4, April, pp.511~515.
4. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.114, No.8, Aug. 1988, pp.1804~1826.
5. Pantazopoulou, S. J. and Mills, R. H., "Microstructural Aspects of the Mechanical Response of Plane Concrete," *ACI Material Journal*, ACI, Vol. 92, No.6, Nov.-Dec. 1995, pp.605~616.
6. Spoelstra, M. R. and Monti, G., "FRP-Confined Concrete Model," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No. 3, Aug. 1999, pp.143~150.
7. Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes," *ACI Material Journal*, ACI, Vol. 96, No.4, July-Aug. 1999, pp.500~509.
8. 천성철, 김지영, 박형철, 박철립, "탄소섬유로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제15권 1호, 1999. 1, pp.27~36.
9. Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Broun, R. L., "A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stress," *Univ. of Illinois Engineering Experimental Station*, Bulletin No. 185, 1928, 104pp.
10. Balmer, G.G., "Shearing Strength of Concrete Under High Triaxial Stress-Computation of Mohr's Envelope as a Curve," *Structural Research Laboratory Report, Report No. SP-23*, U. S. Bureau of Reclamation, 1949, 13pp.
11. Campione, G. and Miraglia, N., "Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP," *Cement & Concrete Composites*, Vol.25, 2003, pp.31~41.
12. Karabinis, A. I. and Rousakis, T. C., "Concrete Confined by FRP Material: a Plasticity Approach," *Engineering Structures*, Vol.24, 2002, pp.923~932.

## 요 약

섬유에 의하여 보강된 콘크리트의 압축강도와 최대 변형률은 현저하게 증가한다. 지난 10여년간 섬유보강 콘크리트의 구속 효과에 대한 많은 연구가 수행되었지만, 기존 제안식의 대부분은 횡구속된 콘크리트의 압축강도 예측에 중점을 두고 있으며, 예측된 최대변형률은 실제값을 과대 또는 과소 평가하는 경향이 있다. 이 논문에서는 콘크리트 실린더 실험을 통해, 섬유보강된 콘크리트의 압축강도 및 최대변형률을 예측할 수 있는 평가식을 제안하였다. 구속콘크리트의 압축강도와 섬유의 파단강도 및 시험체의 크기효과를 고려하여 제안된 평가식은 기존의 제안식보다 정확하게 구속 콘크리트의 압축강도 및 최대 변형률을 예측하였다. 또한 섬유의 응력-변형률곡선의 특성을 고려하여 제안된 구속 콘크리트의 축방향 응력-변형률곡선은 탄소섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률곡선을 기존의 제안식보다 정확하게 추적하였다.

**핵심용어 :** 섬유보강, 횡구속압, 철근콘크리트 기둥, 압축강도, 최대 변형률, 보수, 보강, 횡구속